

[轨道交通]

浅析高速铁路牵引供电系统健康状态综合评估方法

文/中国铁路设计集团有限公司电化电信院 何秋冷

对高速铁路牵引供电系统退化规律进行分析，并对潜在故障与隐藏故障的定义及两者的区别与联系进行了研究，还研究了牵引供电系统安全运行预警机制。在上述成果的基础上，提出了基于免疫机理的健康评估机制，建立了基于层次分析法的牵引供电系统健康评估模型，形成了综合分析评估方法。

经过近20年的蓬勃发展，高铁列车具有准时率高、清洁无污染、运量大及时效性强等特点，在我国国民经济发展中扮演了越来越重要的角色。而高速铁路要实现安全运行，牵引供电系统必须安全、可靠。所有设备一经投运，便进入服役周期。牵引供电系统中如变压器、开关柜、接触线等重要设备的健康状态将直接影响系统的可靠性和稳定性，进而决定了列车运行效果。牵引供电系统中的服役设备如牵引网无热备、架空供电线、受电弓滑动摩擦等方面的故障发生频繁；相关设备多、良品率参差不齐等导致高速铁路牵引供电系统的服役性能和健康状态不稳定，成为高铁供电的重要研究方面。

本文通过对牵引供电系统一二次设备的退化规律进行分析，并对潜在故障与隐藏故障的定义及两者的区别与联系进行了研究。建立了牵引供电系统的健康诊断指标体系，提出了基于免疫机理、多因素的牵引供电系统健康状态评估模型。

牵引供电系统服役性的退化规律研究

牵引供电系统从安全到失效的演变过程，如图1所示。可以看出，设备的故障一般不是一蹴而就的，设备刚投运时处在“健康”状态，此时设备安全运行能够完整地实现预期的功能。随着设备服役

年限的增长，其性能逐渐衰退，进入“亚健康”或“轻微病态”的状态，这时设备中可能存在潜在故障或隐藏故障，这两种形式的故障往往难以检测，需要进行故障预警以及及时发现。若在该阶段未能及时发现潜在故障式隐藏故障，则设备性能将进一步退化，进入“中度病态”或“严重病态”的状态，此时设备的潜在故障将转化为功能性故障，隐藏故障也将表现出一定的功能性后果，即设备已不能实现预期的功能，必须对设备进行快速的故障诊断，以便通过更换故障部件、进行修复性维修等手段使设备恢复正常功能。若此时仍放任不管，设备将彻底失效甚至完全退出运行，将对系统功能造成严重影响，甚至导致整个系统停运。

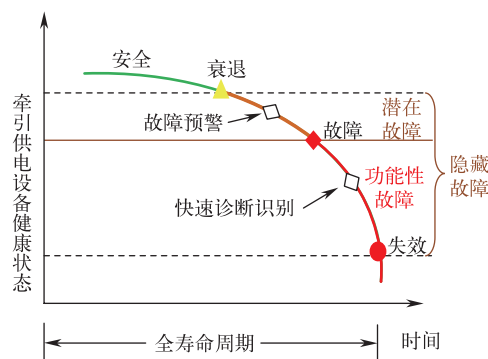


图1 牵引供电设备服役状态演变过程示意图

牵引供电系统安全运行智能预警机制

1. 牵引供电设备监测检测指标与典型故障的关系

由于典型故障形式与监测检测指标的变化并不是一一对应的，如某一种典型故障可能引起多个监测检测指标的变化，而一个监测检测指标的变化也可能是多种典型故障引起的，如图2所示。因此为了更好地处理这种典型故障和监测检测指标间的多对多关系，采用了常见故障表和监测检测指标表两张表格来进行展现。

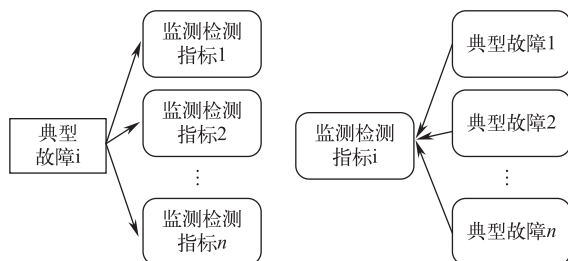


图2 典型故障与监测检测指标的多对多关系

如牵引变压器的典型故障线圈发生匝间短路时，可能引起一次短路电流增大、油温增高、三相直流电阻不平衡和二次线电压不稳等多项监测检测指标的变化，而牵引变压器绕组泄漏电流的异常可能是由绝缘油受潮、绝缘油分解变质、绕组匝间存在污垢及绕组绝缘结构损坏等多种典型故障引起的。

又如互感器的典型故障末屏发生不稳定接地时，可能引起色谱分析为典型故障、末屏绝缘电阻超标和介损损耗因数超标等多项监测检测指标的变化，而互感器局部放电的异常可能是由绝缘油渗漏、绝缘结构损坏等故障引起的。

再如27.5 kV馈线电缆的典型故障中间触头发生绝缘击穿时，可能引起泄漏电流增大、绝缘电阻降低和触头温度过高等多项监测检测指标的变化，而电缆温度的异常可能是由电缆绝缘结构损坏、绝缘中存在水树枝、电缆环流和高阻接地故障等多种典型故障引起的。

2. 安全运行智能预警机制

牵引供电系统安全运行智能预警机制如图3所示。实施过程为：首先根据各种在线监测装置和离线试验手段得到所监测的特征量和所检测的物理量，进行一定的数据预处理（暂态处理、统计处理及模糊处理等）、特征提取和数据融合，得到所需数据源，通过健康诊断方法进行健康评估，将实时

评估结果结合历史数据进行故障预测预警，结合设备的服役参数与退化模型等掌握设备潜在故障的表现特征和影响机理，最后通过健康评估和故障预测预警的结果给出预警输出，指导现场运营维护人员用最合理的方法排除警兆。

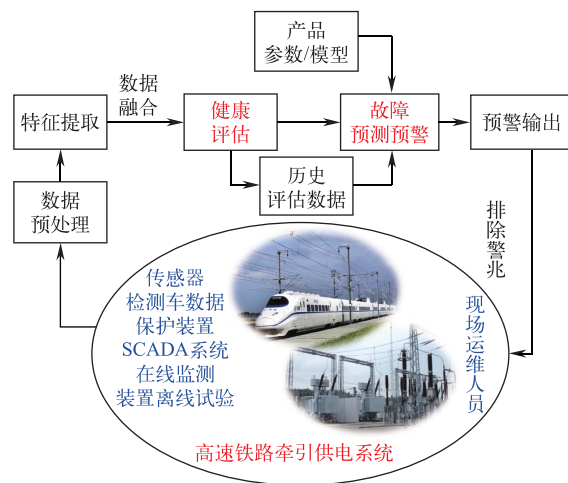


图3 牵引供电系统安全运行智能预警机制

由图3可以看出，牵引供电系统安全运行智能预警机制的核心功能是故障预测预警和健康评估，因此，可按这两大功能将安全运行智能预警机制细分为潜在故障预警机制和健康预警机制。

(1) 潜在故障预警机制

潜在故障预警机制如图4所示。其输入为前面提到的各种监测装置（在线监测装置、SCADA系统、传感器及保护装置等）、检测手段（检测车数据、离线试验等）和仿真工具（ANSYS有限元仿真等），利用这些输入建立潜在故障预测与健康诊断数据源模型，再应用微弱信号征兆特征提取算法进行故障特征提取，利用这些故障特征进行下一步潜在故障和隐藏故障的预测与识别。潜在故障方面，运用潜在故障概率预测方法及模型等通用方法和基于贝叶斯网络的潜在故障概率预测模型、基于隐马尔可夫模型的潜在故障概率预测方法等针对小样本的方法，进行潜在故障的预测，运用这些方法后的预警输出即预测结果，分别可以预测出故障发生点和故障概率；隐藏故障方面，分别运用基于多信源的贝叶斯网络隐藏故障识别方法和基于相关性分析的隐藏故障元件识别方法，进行隐藏故障的识别，运用这些方法后的预警输出即识别结果，分别可以识别出故障表现形式和故障元件。

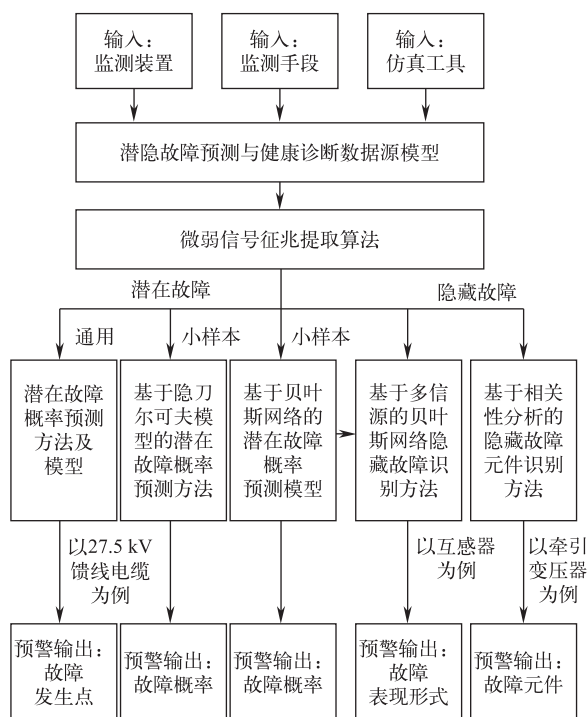


图4 潜隐故障预警机

(2) 健康预警机制

健康预警机制是在基于免疫的健康评估机制的基础上加入输入和输出的完善与扩充后得到的，同时健康预警机制紧接于潜隐故障预警机制，并与潜隐故障预警机制共同组成了安全运行智能预警机制，如图5所示。其中一条输入为牵引供电系统各种监测检测指标，另一条输入为潜隐故障预警机制的输出，即故障发生点、故障概率、故障表现形式和故障元件，经过筛选原则筛选并建立起健康诊断指标体系和健康状态多因素评估模型，将健康指标输入该模型中，分别应用层次分析法、熵权法和模糊隶属度函数等方法进行处理，再通过综合分析评估方法进行评估，分别得到元件（设备）、子系统和系统的健康值，最后根据健康值与健康状态的对应关系得到元件（设备）、子系统和系统的健康状态，若健康状态较差（轻微病态、中度病态和严重病态）时则进行预警输出，提醒现场运营维护人员尽快排除警兆。

设备耦合的牵引供电系统健康状态评估方法

1. 基于免疫机理的健康评估机制

生物体的免疫基本机理是，当抗原输入体内时，经过抗原模式识别器输出识别结果，该结果被

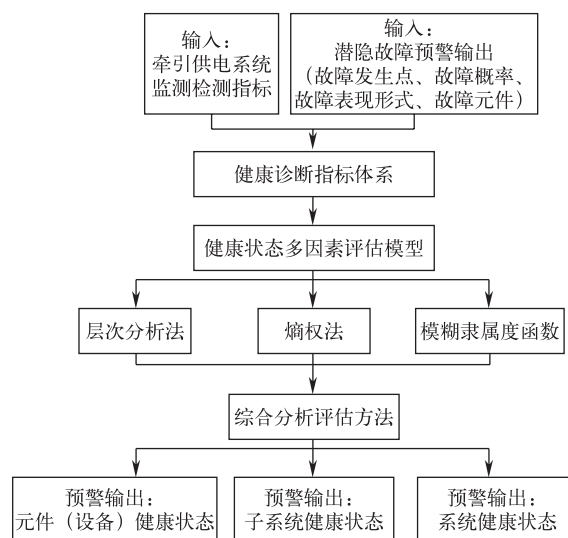


图5 健康预警机制

输送到免疫管理控制器后，经过一系列复杂生化过程生成抗体，以完成免疫过程。免疫系统是生物体的有效自身防卫机制，在自身出现问题或者遇到外来侵袭时，能进行自动修复和抵制防御。该机理对高速铁路供电系统的健康状态检测及评估有重要的借鉴意义。根据免疫的机理，结合牵引供电系统的结构和特点，采用了如图6所示的基于免疫机理的健康评估机制。

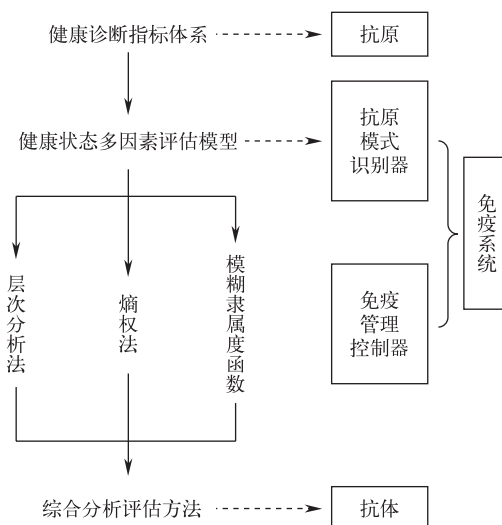


图6 基于免疫机理的健康评估机制

图6中，将健康诊断指标体系类比为抗原，即健康指标相当于是激发整个评估机制运作的激励；将健康状态多因素评估模型类比为抗原模式识别器，健康指标（抗原）输入到该评估模型（识别器）中进行匹配和建模；将层次分析法、熵权法和模糊隶

属度函数等方法类比于免疫管理控制器，利用评估模型（识别器）的参数（输出），采用这些方法（管理控制器中一系列复杂生化过程）组合并生成抗体，即综合分析评估方法，对牵引网设备以及供变电所内设备的健康状态进行综合评估。

2. 系统健康状态评估模型

整个供电系统设备复杂，影响其评估结果的因素有很多，对于这种多元因子决定的模型，设定一个固定因子集 $I=\{I_i|i=1,2,\dots,p\}$ 和一个固定备选因子集 $R=\{R_j|j=1,2,\dots,n\}$ 。

多元因子影响的可列为最符合备选因子集 R_x ，使其尽可能与相关目标 G_i 一致，如果用 R 的模糊子集来表示，则为 $G_i=[\mu_{i,1}(R_1)|R_1,\mu_{i,2}(R_2)|R_2,\dots,\mu_{i,n}(R_n)|R_n]$ 。对牵引网及牵引供变电整个系统的健康状态进行评估，实际就是从因子集里寻找一个最贴近的实际评估结果。

(1) 评估因子集

因子是指评估对象的各种属性和性能。因子集是由影响评估对象的参数指标等各个因子组成的合集，即 $I=\{i_1, i_2, \dots, i_n\}$ 。

牵引供电系统的健康评估因子集源自牵引供电系统中所采用的各种在线监测和离线试验（SCADA系统、绝缘在线监测装置、检测试验车和预防性试验等）所记录的数据。但由于牵引供电系统健康状态涉及的设备众多，原则上是将监测检测数据源进行合理的筛选，将得到的参数指标存放于评估因子集 I 中。

(2) 评估集

设 r_i 为对第 i 个评估对象可能做出的评估结果，由 r_i 构成的集合 $R=\{r_1, r_2, \dots, r_m\}$ 称为评估集。

为了最大限度贴合实际，划分五种状态等级，即 $R=\{\text{健康}, \text{亚健康}, \text{轻微病态}, \text{中度病态}, \text{严重病态}\}$ ，其对应的评估集健康值 $R=\{[0.9600, 1], [0.9, 0.9599], [0.8, 0.8999], [0.6, 0.7999], [0, 0.5999]\}$ 。

“健康”状态表示系统设备运行状态良好，设备性能稳定；“亚健康”状态表示系统个别设备状态趋于下降，但是整个系统性能基本稳定；“轻微病态”表示系统设备整体趋于老化，比如电缆、牵引网等，出现故障的概率增加，需要密切关注其变化；“中度病态”表示某些设备出现故障频率较

大，系统运行状态不佳，需进行状态检测及维修；

“严重病态”是指设备开始出现严重故障，系统稳定性、安全性差，需要立即整修或更换。

(3) 权重集

不同的评估因子在系统健康状态评估过程中的重要程度是不一样的，故设定权重集 $W=\{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ ，以体现各参数的影响大小。权重满足归一性 $\sum_{i=1}^n w_i=1, (w_i \geq 0)$ 。

各参数指标因子的权重决定了评估结果的准确性，故确定合理的权重在牵引供电系统健康评估中尤为关键。常用的方法有层次分析法、统计实验法、专家评分法和熵权法等。

3. 层次分析法

高速铁路牵引供电系统分层分析模型如图7所示。

图7将牵引供电系统各子系统之间的相互连接及影响通过层次分析法表现出来。第一层为系统层（S），对整个系统的健康状态进行整体评估；第二层为子系统层（U），对牵引网子系统、牵引变电所子系统、分区所子系统和AT所子系统等分别进行健康状态评估；第三层为设备层（E），对各个子系统的设备，如牵引网的接触线、承力索、绝缘子、腕臂吊弦及各牵引所亭内的变压器、隔离开关、断路器、避雷器、中压互感器、中流互感器和电缆等部件进行评估；第四层为指标层（I），通过对设备元器件的特性进行监测，形成该层指标参数。

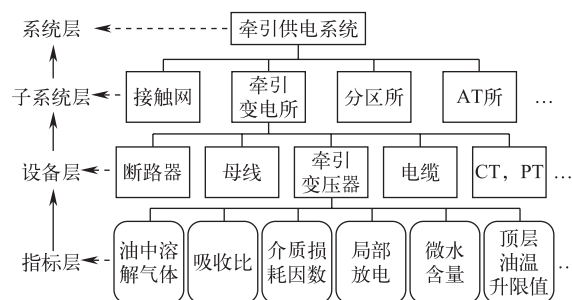


图7 高速铁路牵引供电系统分层分析模型

根据图7的层次划分，构建各元素的对比矩阵

$$A=(a_{ij})_{n \times n} \quad (1)$$

以牵引变压器为例，从预警机制中的监测检测指标中筛选出评估牵引变压器健康状态所需的

参数,构成了评估因子集 $I=\{\text{油中溶解气体(总烃含量)}, \text{吸收比}, \text{介质损耗因数}, \text{局部放电}, \text{微水含量}, \text{顶层油温升}\}$ 。对该因子集构建成对比较矩阵:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 2 & 3 & 3 & 0.33 \\ 0.5 & 1 & 2 & 3 & 4 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 1 & 2 & 3 & 0.5 \\ 0.33 & 0.33 & 0.5 & 1 & 2 & 0.25 \\ 0.33 & 0.25 & 0.33 & 0.5 & 1 & 0.2 \\ 3 & 2 & 2 & 4 & 5 & 1 \end{pmatrix}$$

$$w = (w_1, w_2, \dots, w_n) \quad (2)$$

$$CR = CI / RI \quad (3)$$

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (4)$$

式中, CI 为成对比较矩阵 A 的一般一致性偏离程度指标; $\lambda_{\max}$ 为 A 的最大特征值; CR 为成对比较矩阵 A 的随机一致性比率; RI 为成对比较矩阵 A 的平均随机一致性指标,用以消除矩阵阶数的影响。阶成对比较矩阵的 RI 值见表1。

表1 n 阶成对比较矩阵的 RI 值

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51

若 $n \geq 3$,当 $0 < CR < 0.10$ 时,该权重分配较为合理,反之则需要调整。

4. 牵引供电系统健康状态评估方法

根据上文中建立的五个等级,构建评估状态指标矩阵

$$D_i = [\lambda_i^{(1)}, \lambda_i^{(2)}, \lambda_i^{(3)}, \lambda_i^{(4)}, \lambda_i^{(5)}] \quad (5)$$

令

$$e_i = \max\{\lambda_i^{(s)}\}, \quad s = 1, 2, \dots, 5$$

设定 I_j 处于“中度病态”和“严重病态”为非健康状态,即 $e_j = \lambda_j^{(4)}$ 或 $e_j = \lambda_j^{(5)}$ 时的输出值为1; I_j 处于“健康”“亚健康”或“轻微病态”时,系统为正常运行,即 $e_j = \lambda_j^{(1)}$ 或 $e_j = \lambda_j^{(2)}$ 或 $e_j = \lambda_j^{(3)}$ 时输出值为0。

客观修正系数

$$\alpha_i = \frac{1/e_i}{\sum 1/e_i} \quad (6)$$

可推算出健康系统各层级指标综合权重为

$$\beta_i = \frac{\alpha_i w_i}{\sum \alpha_i w_i} \quad (7)$$

将底部指标层监测的各项参数反射到上一层级,得到设备元件状态序列向量为

$$K_I = (K_1, K_2, \dots, K_n) \quad (8)$$

$K_i (i=1, 2, \dots, n)$ 取值0或1,为底部监测到的电气量信息, n 表示监测的电气量监测指标之和。

由此推算出指标层对元件层的作用因素可表示为

$$\gamma_E = K_I \beta_I^T \quad (9)$$

式中, $\beta_I = (\beta_i)_{1 \times n} (i=1, 2, \dots, n)$,代表某设备元件下的所有电气量的综合影响力向量。

据此逐级递推,可得到设备元件层对牵引供电各子系统层和各子系统层对整个牵引供电系统层的作用因素分别为

$$\gamma_U = \gamma_E w_E \quad (10)$$

$$\gamma_S = \gamma_U w_U \quad (11)$$

式中, w_E 与 w_U 为下层级反射到上一层级的相对权重影响值。

最后可根据式(12)~式(14)分别计算出设备元件(元件层)、各子系统和牵引供电系统的健康状态分值,即

$$H_E = 1 - \gamma_E \quad (12)$$

$$H_U = 1 - \gamma_U \quad (13)$$

$$H_S = 1 - \gamma_S \quad (14)$$

$H \in [0, 1]$, H 值越大,则表示设备、各系统或整个牵引供电系统的健康状态就越好,系统运行越稳定可靠。通过该方法实现了对牵引供电系统健康状态的定量测评,为运维人员发现设备的早期故障及实现供电设备的状态维修与健康管理等提供了参考价值。

结束语

综上所述,对牵引供电系统重要设备的健康状态进行评估,对发现设备的早期故障及实现供电设备的状态维修与健康管理等具有积极的意义,为牵引供电系统的检测检修提供了技术依据的同时,该评估数据还能运输组织提供参考。EA

参考文献

- [1] 程宏波. 计及不确定性的牵引供电系统健康诊断及风险评估方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [2] 张翼翔, 王鑫. 重载铁路牵引变电所电流增量保护动作分析[J]. 电气应用, 2020, 39(11): 80-85.

(收稿日期: 2022-03-17)